

中澳欧风荷载规范的对比研究

夏瑞光, 范存新

(苏州科技学院 江苏省结构工程重点实验室, 江苏 苏州 215011)

摘 要: 首先,对中、澳、欧风荷载规范中影响平均风荷载和脉动风荷载的主要参数进行了对比研究。然后,基于随机振动理论,通过算例对不同风速谱和不同相干函数下的脉动风响应进行了计算分析。最后,按照中澳欧三种风荷载规范分别计算了柔性结构和刚性结构的荷载和响应,并进行了比较分析。

关键词: 风荷载规范;基本风速;风速谱;相干函数;湍流强度

中图分类号: TU312*.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-0679(2012)03-0013-06

近年来,全球气候变化较大,由风灾引起的损失逐年增加,其中与结构损坏有关的风灾更是不胜枚举,加之工程结构向着大跨、高、柔、轻质的方向发展,风荷载正逐渐成为结构设计时的主要控制荷载之一,这都要求对风荷载及其效应有准确的认识。结构抗风设计的主要依据是风荷载规范,对比研究各国家或地区的风荷载规范对我国规范的改进也有着重要的借鉴意义。国外学者针对一些主要国家或地区的规范做了对比研究^[1-2],取得了一些研究成果,但均未取中国规范为研究对象。我国学者将中国规范与其他主要规范做了一些比较研究,并指出了中国规范亟待改进的一些地方^[3-7]。欧洲规范在结构风荷载和结构抗风设计方面居于世界领先水平,而我国学者研究较少;澳大利亚风荷载规范在进行修订后,新规范于 2011 年发布,具有较好的时效性。因此,取澳大利亚规范(AS/NZS1170.2:2011^[8])、欧洲规范(EN 1991-1-4:2005^[9])与中国风荷载规范(GB5009-2001^[10])进行对比研究具有很好的研究价值。

作用于结构上的风荷载分为平均风荷载和脉动风荷载。工程设计中,平均风荷载主要取决于基本风速(风压)、风压高度变化系数和体型系数等参数;脉动风荷载主要由脉动风的风速谱、相干函数和湍流强度等参数决定。文中对三种风荷载规范的这些主要参数等进行了对比研究,并通过算例进行了分析。

1 平均风荷载的主要影响参数

1.1 基本风速(风压)

中国规范是规定的基本风压,澳欧两规范规定的是基本风速。基本风速(风压)通过以下 6 个条件的规定来定义,见表 1。

表 1 基本风速(风压)对比

类别	中国	澳大利亚	欧洲
	GB5009-2001:2006	AS/NZS1170.2:2011	EN 1991-1-4:2005
标准地貌类别	空旷平坦地面(B类)	开敞地区(2类)	空旷地区(II类)
平均风速时距	10 min	3 s	10 min
标准高度	10 m	10 m	10 m
重现期	50 a	可选	50 a
最大风速样本	年最大风速	年最大风速	年最大风速
风速的线型	耿贝尔极值 I 型分布	耿贝尔极值 I 型分布	耿贝尔极值 I 型分布

根据中澳欧风荷载规范关于地貌类别的描述,可以认为中国规范中的 A 类地貌对应于澳规 1 类地貌,欧规 0 和 I 类地貌;中国规范的 B、C、D 类地貌分别对应于地对应于澳规 2、3、4 类地貌,欧规 II、III、IV 类地貌。因此,三种规范对标准地貌类别的规定是一致的。那么由表 1 可得,中澳欧风荷载规范关于基本风速(风

[收稿日期] 2012-03-31

[作者简介] 夏瑞光(1986-),男,河南鹤壁人,硕士研究生。

通讯联系人:范存新(1968-),男,教授,博士,从事工程结构的力学分析等方面的研究,Email:fan@mail.usts.edu.cn。

压)的规定主要区别在于平均风速时距,中欧两规范取 10 min 为平均风速时距,而澳规选取的平均风速时距为 3 s,接近瞬时风速,澳规中的基本风速大于中欧规范中的基本风速。

1.2 风压高度变化系数

平均风速随高度变化的图形称为风剖面^[1]。各规范通过相应参数来描述风剖面见表 2。由于中国规范是规定的基本风压,而澳欧两规范规定的是基本风速,所以取地貌/高度乘数的平方 $M_{z,cat}^2$ 、粗糙度系数的平方 $c_z^2(z)$ 和风压高度变化系数 μ_z 进行比较,见图 1。不妨将 $M_{z,cat}^2$ 、 $c_z^2(z)$ 和 μ_z 统称为风压高度变化系数。

表 2 描述风剖面的参数

中国: 风压高度变化系数 μ_z	澳大利亚: 地貌/高度乘数 $M_{z,cat}$	欧洲: 粗糙度系数 $c_z(z)$
$\mu_z^A = 1.379 (\frac{z}{10})^{0.24}$	可通过规范中的表格查得	$z_{min} \leq z \leq z_{max}$ 时, $c_z(z) = k_r \cdot \ln(\frac{z}{z_0})$
$\mu_z^B = 1.000 (\frac{z}{10})^{0.32}$		$z \leq z_{min}$ 时, $c_z(z) = c_z(z_{min})$
$\mu_z^C = 0.616 (\frac{z}{10})^{0.44}$		其中 $k_r = 0.19 (\frac{z_0}{z_{0,I}})^{0.07}$
$\mu_z^D = 0.318 (\frac{z}{10})^{0.60}$		

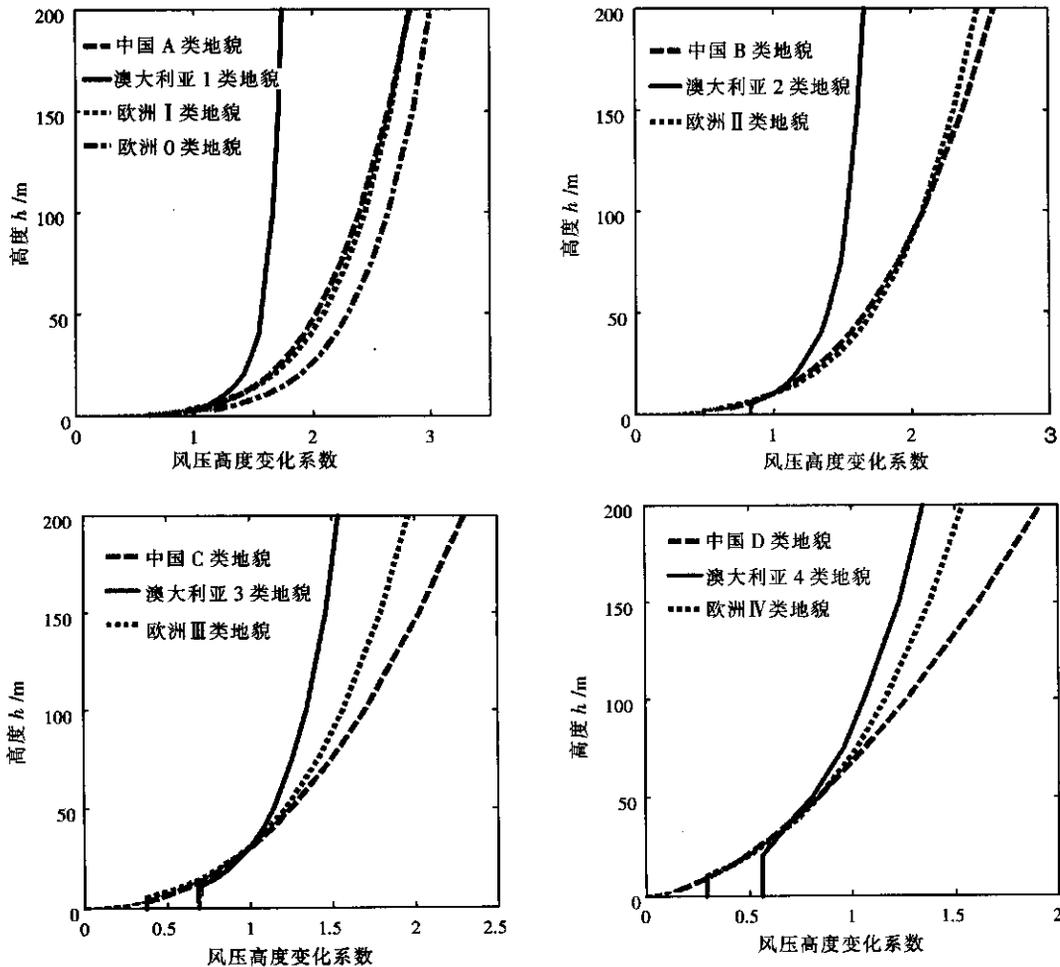


图 1 不同地貌类别上的风压高度变化系数

由图 1 可得:(1)澳大利亚规范风压随高度变化最小,中国规范中平均风压随高度变化最大;(2)在 A 和 B 类地貌上,中国和欧洲规范的风剖面非常接近,但在 C 类和 D 类地貌上,两规范的风剖面随着高度的增加

差别越来越大;(3)在远离地面的上空,中国的风压高度变化系数最大,欧规次之,澳规最小。但中国规范的风剖面在近地面取值最小。

1.3 体型系数

对中澳欧三规范中关于体型系数的规定进行比较可得:(1)中国规范为了简化计算,每一受风面的体型系数采用了相同的值,而澳欧两规范则不同程度的考虑了同一表面各处风压不一致的现象;(2)中国规范忽略了平行于表面积的风力作用;而澳欧两规范在平行于风向的面积较大时,均考虑了剪切风力的影响;(3)三种规范都对结构的外压体型系数和内压体型系数作了具体规定,但澳欧两规范的规定更为细致,考虑的更为全面,中国关于体型系数的规定较为简略,尤其是对局部压力系数和内压系数的规定过于简单。

2 脉动风荷载的主要影响参数

2.1 风速谱

自然界某一时段内的脉动风速可以用平稳随机过程来模拟,因此脉动风功率谱就成为表达脉动风速特性的主要方式。中澳欧规范采用的风速谱见表 3。在 200 m 和 40 m 高度处,规格化的脉动风功率密度函数 $S_f(n)$ 如图 2 所示(10 m 高度处平均风速取 30 m/s)。

表 3 中澳欧三规范的风速谱

规范	谱种类	谱函数形式
中国规范	Davenport 谱	$S_v(n) = \frac{4kx^2 \cdot \bar{v}_{10}^2}{n(1+x^2)^{4/3}}, x = 1.200 \frac{n}{v_{10}}$
澳大利亚规范	Harris 谱	$\frac{nS_v(n)}{\sigma_v^2} = \frac{4x}{6.677(2+x^2)^{5/6}}, x = \frac{nL_H}{v_H}, L_H = 1000 \left(\frac{H}{10}\right)^{0.25}$
欧洲规范	Kaimal 谱	$\frac{nS_v(z, n)}{\sigma_v^2} = \frac{6.8x}{(1+10.2x)^{5/3}}, x = \frac{nL(z)}{v_z}, L(z) = 300 \left(\frac{z}{200}\right)^{0.67+0.08 \ln(x)}$

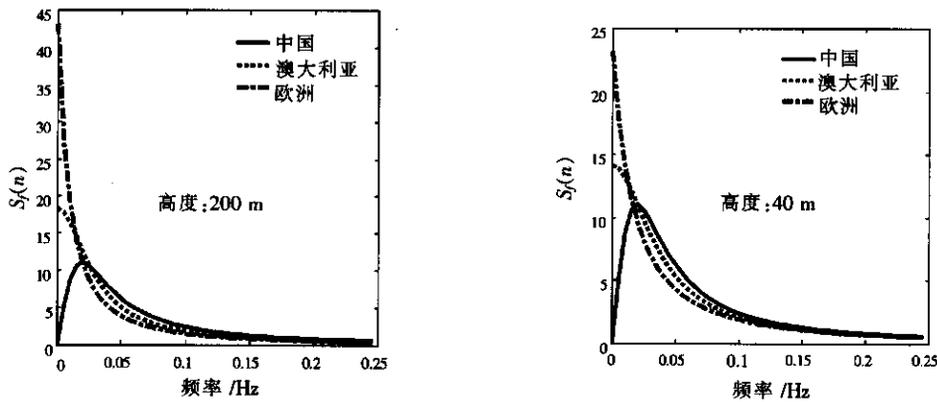


图 2 200 m 和 40 m 高度处的风谱

由图 2 可以看出,三种风谱在 0.01~0.03 Hz 之间谱值比较接近,在 0~0.01 Hz 之间谱值由大到小依次为欧、澳、中,在 0.03~0.15 Hz 谱值由大到小则为中、澳、欧。建筑物的自振频率一般在 0.10~5 Hz,在此区段内中国规范的谱值最大,在计算共振响应时,中国规范谱算出的值比其他国家要大。脉动风的背景响应主要与谱下的面积有关,可以看出除欧洲风谱所围面积较大外,其余两风速谱所围面积近似相等,欧洲规范谱计算得到的背景响应稍大。

2.2 相干函数

相干函数是描述空间两点脉动风荷载在频域上的相关程度,又称为频域相关系数。中国规范采用的是 Shiotami 建议的相干函数,而澳欧两规范采用的是 Davenport 建议的相干函数,各相干函数的表达式如表 4。

2.3 湍流强度

湍流强度是脉动风速的均方差除以平均风速。中国规范没有对湍流强度进行专门说明,但结合湍流强

度的定义,由中国规范中的脉动系数可得到中国规范湍流强度的表达式,见表5,不同地貌类别场地上的湍流强度如图3所示。

表4 相干函数

相干函数种类	表达式
Shiotami 建议的相干函数	$\text{Coh}(x, x', z, z') = \exp \left\{ - \left[\frac{(x-x')^2}{L_x^2} + \frac{(z-z')^2}{L_z^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$, 建议 $L_x=50, L_z=60$
Davenport 建议的相干函数	$\text{Coh}(x, x', z, z', n) = \exp \left\{ - \frac{n [C_x^2(x-x')^2 + C_z^2(z-z')^2]^{\frac{1}{2}}}{\bar{v}_z} \right\}$, 建议 $C_x=7, C_z=8$

表5 中澳欧三规范的湍流强度

中国规范	澳大利亚规范	欧洲规范
$I(z) = 0.1 \times 35^{1.8(\alpha-0.16)} \left(\frac{z}{10} \right)^{-\alpha}$	以表格的形式给出	$I_e(z) = \frac{1}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)}, z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$
		$I_e(z) = I_e(z_{\min}), z \leq z_{\min}$

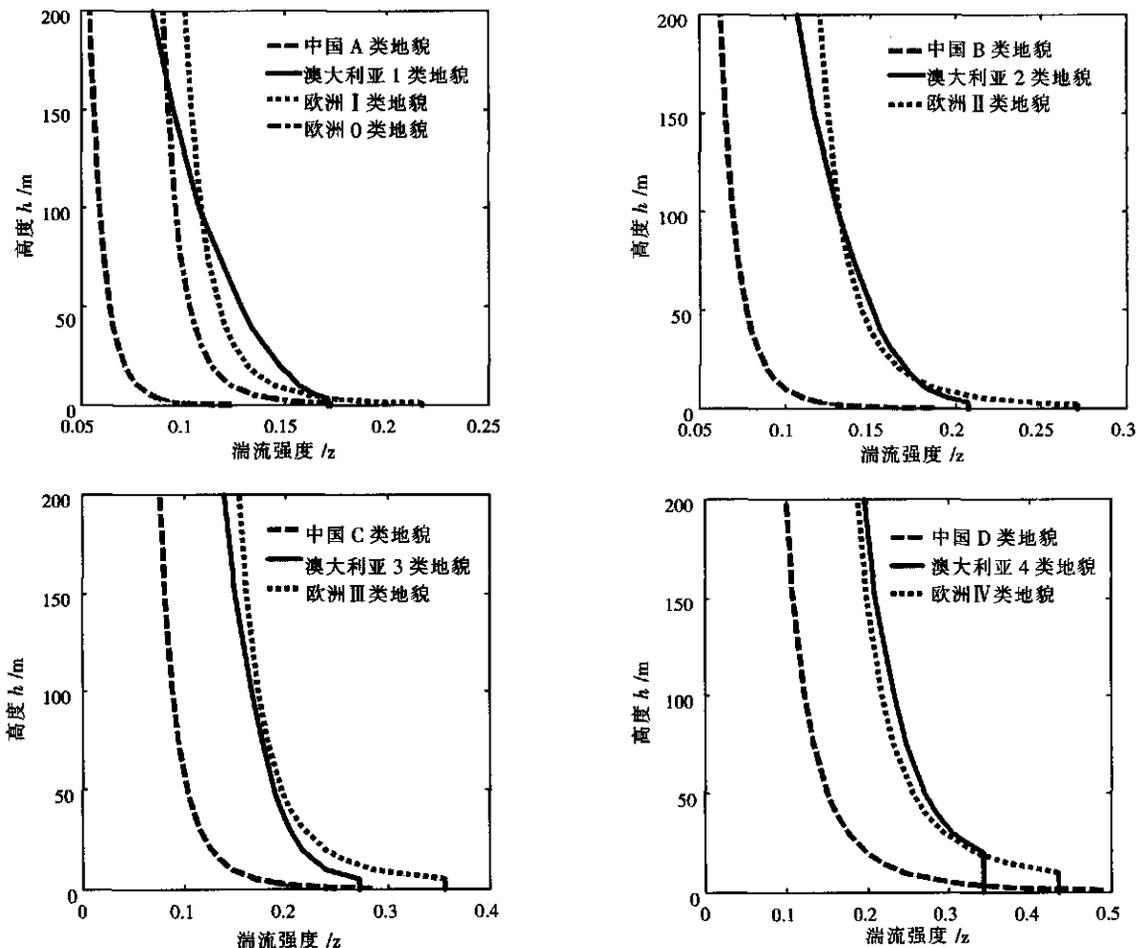


图3 不同地貌类别上的湍流强度

由图3可以看出,澳欧两规范湍流强度的取值比较接近,中国规范的湍流强度明显小于澳欧两规范。在A类和B类地貌上,澳欧规范的湍流强度是中国的3倍甚至更多,即使在C类和D类地貌上,澳欧两规范的湍流强度也是中国的2倍左右。

3 算例比较

3.1 不同的风速谱计算结构的脉动响应

结合风振理论^[2],在其他参数一致的情况下(与中国规范的取用一致),分别采用三种不同的风速谱,计算结构(计算参数如表6所示)的脉动风响应,并以中国规范风速谱的计算结果为基准,算得相对比值进行比较,结果如表7所示。

表6 计算参数

结构种类	频率 /Hz	阻尼比	单位高度质量 m_w / (kg/m)	宽×长×高 / (m×m×m)	基本风压 / (kN/m ²)	地貌类别
柔性结构	0.20	0.01	300 000	40×40×200	0.60	C
刚性结构	1.60	0.05	160 000	20×20×40	0.55	C

表7 不同风速谱计算的结构脉动响应

结构响应	中国规范谱		澳大利亚规范谱		欧洲规范谱	
	计算值	相对比值 /%	计算值	相对比值 /%	计算值	相对比值 /%
柔性结构	基底剪力 /kN	1.001×10 ⁴	9.774×10 ³	97.6	9.170×10 ³	91.6
	基底弯矩 / (kN·m)	1.365×10 ⁶	1.333×10 ⁶	97.6	1.229×10 ⁶	90.0
	位移/20 m_w /m	1.105×10 ³	1.079×10 ³	97.6	0.967×10 ³	87.5
刚性结构	基底剪力 /kN	276.083	275.440	99.8	294.556	106.7
	基底弯矩 / (kN·m)	7.628×10 ³	7.611×10 ³	99.8	8.056×10 ³	105.6
	位移/5 m_w /m	0.583	0.582	99.8	0.606	104.0

由表7可以看出,计算结果与前面的分析相吻合。对于柔性结构,中国规范谱计算的响应值最大,然后依次为澳、欧。对于刚性结构,欧洲风谱计算的响应要比其它两种谱的响应大5%左右,中国规范谱和澳大利亚规范谱计算的响应基本相等。

3.2 由不同的相干函数计算结构的脉动响应

结合风振理论,在其他参数一致的情况下(与中国规范的取用一致),采用不同的相干函数,计算表6所示结构的脉动风响应,并以 Shiotami 建议的相干函数计算结果为基准进行比较,结果如表8所示。

表8 不同相干函数计算的结构脉动响应

结构响应	Shiotami 建议的相干函数		Davenport 建议的相干函数	
	计算值	相对比值 /%	计算值	相对比值 /%
柔性结构	基底剪力 /kN	1.001×10 ⁴	9.045×10 ³	90.4
	基底弯矩 / (kN·m)	1.365×10 ⁶	1.233×10 ⁶	90.4
	位移/20 m_w /m	1.105×10 ³	9.984×10 ²	90.4
刚性结构	基底剪力 /kN	276.083	228.867	82.9
	基底弯矩 / (kN·m)	7.628×10 ³	6.324×10 ³	82.9
	位移/5 m_w /m	0.583	0.483	82.9

由表8可得:(1)Davenport 建议的相干函数考虑了频率,计算的结构响应小于没有考虑频率的 Shiotami 建议的相干函数。这是因为 Davenport 建议的空间相干函数随着频率的增加而变小,为递减函数,而 Shiotami 空间相干函数不随频率发生变化。(2)不同相干函数的取用对刚性结构的影响更大。采用 Davenport 建议的相干函数,柔性结构的响应比不考虑频率的相干函数小了10%,而刚性结构比不考虑频率的相干函数小了17%。

3.3 由不同的规范计算结构的荷载和总响应

中澳欧三种风荷载规范的风荷载可由下式分别表示

$$\text{中国规范: } w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1)$$

$$\text{澳大利亚规范: } p = (0.5\rho_{air}) [V_{des, \theta}]^2 C_{fig} C_{dyn} \quad (2)$$

$$\text{欧洲规范: } F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \quad (3)$$

式(1)中, β_z 为高度 z 处的风振系数; μ_s 为风荷载体型系数; μ_z 为风压高度变化系数; w_0 为基本风压。式

(2)中, ρ_{air} 为空气密度; $V_{dir,0}$ 为建筑物各正交方向的设计风速; C_{ng} 为空气动力体型系数; C_{dyn} 为动力响应因子(除风敏结构外,该值取为1)。式(3)中, $c_s c_d$ 为结构系数,用以反映结构的动力特性; c_f 为结构整体或构件的力系数; $q_p(z_e)$ 为参考高度处的极值速度风压。风荷载沿高度变化情况如图4所示。

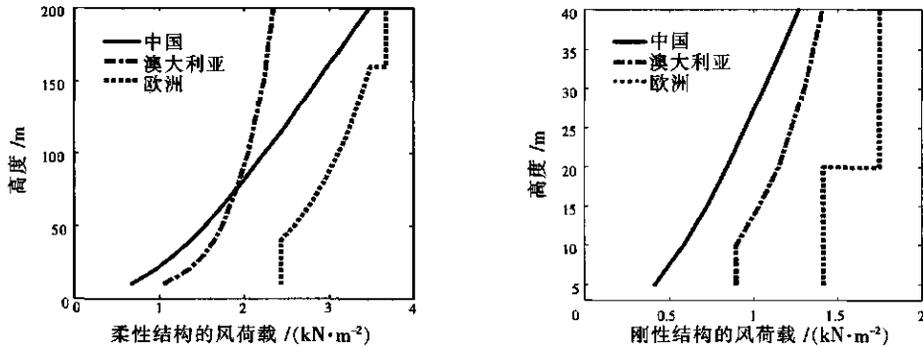


图4 柔性结构和刚性结构的风荷载

按照中澳欧三种风荷载规范,结合表6给出的结构参数,计算结构的基底剪力和基底弯矩,并以中国规范所得响应为基准进行比较,结果如表9所示。

表9 不同规范计算的结构总响应

结构响应		中国规范		澳大利亚规范		欧洲规范	
		计算值	计算值	相对比值 /%	计算值	相对比值 /%	
柔性结构	基底剪力 /kN	1.722×10^4	1.524×10^4	88.5	2.468×10^4	143.3	
	基底弯矩 / (kN·m)	2.112×10^6	1.704×10^6	80.7	2.672×10^6	126.5	
刚性结构	基底剪力 /kN	0.638×10^3	0.814×10^3	127.6	1.264×10^3	198.3	
	基底弯矩 / (kN·m)	1.573×10^4	1.874×10^4	119.1	2.662×10^4	169.2	

分析可得:(1)对于柔性结构,欧洲规范所得响应最大,其次是中国,澳大利亚规范计算的响应最小。对于刚性结构,欧洲规范算得的响应最大,其次为澳大利亚规范,中国规范最小。欧洲规范中引入了暴露系数 $c_e=1+7I_s(z)$,来考虑湍流度的对风压的影响,因此欧洲规范计算结果较中澳规范大。(2)如图4所示,对于柔性结构,下部澳规的风压大于中国,上部中国规范的风压大于澳规。这是因为澳规的基本风速比中国大,所以在下部澳规的风压较大,但是中国规范平均风速沿高度变化较澳规大,所以随高度的增加中国规范的风荷载超过了澳规。对于刚性结构,高度较低,澳规风压大于中国规范。

4 结论

通过参数的比较和算例分析,可得如下结论:

(1)澳规的基本风速比中欧规范大;我国风荷载规范关于体型系数的规定相对比较简单;澳规的平均风速沿高度的变化较中欧规范小。

(2)相对于澳欧规范中的湍流强度,我国对湍流强度考虑不够;用我国规范的风速谱进行计算,相对比较保守;采用不考虑频率影响的相干函数计算的响应偏大。

(3)采用欧洲规范计算的结构响应远大于中澳两规范;对于柔性结构中国规范计算的响应大于澳规,但对于刚性结构澳规计算的响应大于中国规范。

参考文献:

- [1] Yin Zhou, Tracy Kijewski, Ahsan Kareem. Along-wind load effects tall buildings: comparative study of major international codes and standards[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 12: 788-796.
- [2] Dan Lungu, Pieter Van Gelder, Romeo Trandafir. Comparative study of eurocode 1, ISO and ASCE procedures for calculating wind loads [J]. Journal of structural engineering, 2000: 456-470.
- [3] 洪小健. 顺风向等效风荷载及响应[J]. 建筑结构, 2004, 34(7): 39-43.

(下转第49页)

- [2] 沈玉麟. 外国城市建设史[M]. 北京: 中国建筑出版社, 1989.
- [3] 张曦, 葛昕. 历史街区的生活方式保护与文化遗产——看苏州古街坊改造[J]. 规划师, 2003(6): 15-19.
- [4] 上海同济城市规划设计研究院, 国家历史文化名城研究中心. 苏州古城平江历史街区保护与整治规划[R]. 2004.

Space composite study on the "Street-River" of the Suzhou Pingjiang historic district

LIU Bin¹, YANG Zhongwei¹, FENG Zhenhua²

(School of Architecture and Urban Planning, SUST, Suzhou 215011, China; 2. School of Architecture and Art Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: By analyzing the space characteristics of "Street-River" in Pingjiang historic district, the article came to conclusion that the complexity of "Street-River" in the district can be reflected from three levels: space form, function and landscape, and the space composite of "Street-River" in the district is mainly optimized by the coordination between the continuous and the identical, rhythm and rhyme, proportion and yardstick.

Key words: Pingjiang historic district; Street-River; space composite

(责任编辑: 卢文君)

(上接第18页)

- [4] 赵杨. 中美日建筑结构抗风设计规范的比较研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [5] 黄韬颖. 中美澳三国风荷载规范比较[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [6] 金新阳. 亚太地区各国风荷载规范的现状和发展趋势[C]//第十一届全国结构风工程学术会议论文集, 北京: 中国土木工程学会, 2003.
- [7] 瞿伟廉, 梁枢果, 项海帆, 等. 对我国建筑结构风荷载规范修改的几点建议[C]//第十一届全国结构风工程学术会议论文集, 北京: 中国土木工程学会, 2003.
- [8] Australia/New Zealand standard. AS/NZS 1170.2:2011 Structural design actions Part 2: Wind actions[S].
- [9] BS EN 1991-1-4:2005 Eurocode1: Actions on structures-General actions-Part1-4: Wind actions[S].
- [10] GB50009-2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [11] 克莱斯·迪尔比耶, 斯文·奥勒·汉森. 结构风荷载作用[M]. 薛素铎, 李雄彦, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [12] 张相庭. 结构风压和风振计算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.

Contrastive study of Chinese, Australian and European wind load codes

XIA Ruiguang, FAN Cunxin

(Jiangsu Key Laboratory of Structure Engineering, SUST, Suzhou 215011, China)

Abstract: First, the contrastive research was conducted on the main parameters which affect the mean wind load and fluctuating wind load in the codes of China, Australia and Europe. Then, based on the random vibration theory, the response induced by fluctuating wind under different wind spectrums and different coherence functions were calculated and analyzed. Finally, according to the three wind load codes, the load and response of a flexible structure and a rigid structure were calculated respectively, and the comparative analysis was carried out.

Key words: wind load code; basic wind velocity; wind spectrum; coherence function; turbulence intensity

(责任编辑: 经朝明)